⑲日本国特許庁(JP)　⑪特許出願公開

⑫公開特許公報(A)　平4−143634

⑤Int. Cl.⁵	識別記号	庁内整理番号	㊸公開　平成4年(1992)5月18日
G 01 N 3/32	A	7005−2J	
	E	7005−2J	

審査請求　未請求　請求項の数 5　(全8頁)

㊹発明の名称　金属材料の熱疲労寿命の推定方法

㉑特　願　平2−266976

㉒出　願　平2(1990)10月4日

㉒発明者　木村　浩文　栃木県真岡市鬼怒ケ丘11番地　日立金属株式会社素材研究所内

㉒発明者　大塚　公輝　栃木県真岡市鬼怒ケ丘11番地　日立金属株式会社素材研究所内

㉑出願人　日立金属株式会社　東京都千代田区丸の内2丁目1番2号

明　細　書

1．発明の名称

金属材料の熱疲労寿命の推定方法

2．特許請求の範囲

（1）常温以上の温度で熱サイクルを受ける金属材料において，主成分が同一系の金属材料を少なくとも2種類以上用いて，ある温度範囲で1回の加熱と冷却を1サイクルとし，塑性ひずみを生じる熱疲労試験を行い，熱疲労寿命を求め，その熱疲労試験サイクルの応力−ひずみヒステリシスループの面積（以下エネルギ損失という）を測定し，一方，前記熱疲労試験と同一材質の別の試験片を用い，引張試験で測定して求められる耐力をエネルギ損失で除した値と熱疲労寿命の関係を近似式化して，目的とする金属材料の熱疲労寿命をその材料での耐力／エネルギ損失の値から推定することを特徴とする金属材料の熱疲労寿命の推定方法。

（2）常温以上の温度で熱サイクルを受ける金属材料において，主成分が同一系の金属材料を少なくとも2種類以上用いて，ある温度範囲で1回の加熱と冷却を1サイクルとし，塑性ひずみを生じる熱疲労試験を行い，熱疲労寿命を求め，その熱疲労試験サイクルの応力−ひずみヒステリシスループから塑性ひずみ範囲を測定し，一方，前記熱疲労試験と同一材質の別の試験片を用い，引張試験で測定して求められる耐力を塑性ひずみ範囲で除した値と熱疲労寿命の関係を近似式化して，目的とする金属材料の熱疲労寿命をその材料での耐力／塑性ひずみ範囲の値から推定することを特徴とする金属材料の熱疲労寿命の推定方法。

（3）拘束率が0を越えることを特徴とする請求項1および請求項2記載の金属材料の熱疲労寿命の推定方法。

（4）最低温度が−40℃以上で，前記加熱と冷却での試験片標点部の最高温度と最低温度の差が300℃以上であることを特徴とする請求項1および請求項2記載の金属材料の熱疲労寿命の推定方法。

（５）拘束率が０を越える値で，最低温度が－４０℃以上，前記加熱と冷却での試験片標点部の最高温度と最低温度の差が３００℃以上であることを特徴とする請求項１および請求項２記載の金属材料の熱疲労寿命の推定方法。

３．発明の詳細な説明

〔産業上の利用分野〕

本発明は，高温で使用される機械構造物に用いられる金属材料の熱疲労寿命の推定方法に関する。

〔従来の技術〕

鉄系材料の熱疲労寿命は，例えば，加熱と冷却にともなう自由熱膨張変位を完全に拘束し（拘束率が１の条件），最高温度と最低温度の差が７００℃の条件下で求めた場合，寿命の短い材料で１００サイクル程度，寿命の長い材料では５００サイクル以上を有する。また，加熱・冷却の温度範囲が大きいため，熱疲労試験機での１サイクルに要する時間は１０分前後を必要とするため，試験片が破損するまで熱疲労試験を行うことによって，各種金属材料の熱疲労寿命を求めるには，多大な時間と労力を必要とする。そのため，熱疲労寿命を推定する方法がいろいろ提案されている。

特開昭６０－２５９９２９号には，比較的振幅の小さな繰返しひずみに対する塑性ひずみを求め，従来の高温低サイクル疲労試験で得られる定数β，Ｃを用いた式で熱疲労寿命を予測する方法を開示している。また，特開昭５３－６６８１９号には，高炭素オーステナイト系遠心鋳造管の熱疲労寿命改善方法として，高炭素オーステナイト系遠心鋳造管に過時効熱処理を施して，基地中のＣｒ量を低下させることにより，繰返し疲労変形時の疲労損傷を表す応力－ひずみヒステリシスの面積を小さくすることにより，寿命を向上させる方法についての開示がある。これは，寿命向上前の材料と寿命向上後の材料の，応力－ひずみヒステリシスの面積の変化から寿命の変化を検討し，改善しようとするものである。

〔発明が解決しようとする課題〕

特開昭６０－２５９９２９号は，同一の材質についての熱疲労寿命を推定するものである。従って，異なった材質の熱疲労寿命を推定するには，少なくとも２回以上異なった試験条件下で高温低サイクル疲労試験を行い，定数β，Ｃを求める必要があり，各種材質の熱疲労寿命を推定するには，多大な時間と労力を必要とする問題点がある。特開昭５３－６６８１９号は，応力－ひずみヒステリシスループの面積を小さくすることによる熱疲労寿命の改善方法であり，その面積と寿命の関係からの寿命の推定はできない。

本発明の目的は，上記従来の問題点を解決し，金属材料の範疇における異種材質の熱疲労寿命を推定すること，さらにそれを短時間で行うことを目的とする。

〔課題を解決するための手段〕

本発明者は，各種金属材料の熱疲労試験を行った結果，耐力が大きいほど熱疲労寿命が長くなるとの知見を得た。また，一般に熱疲労試験では，熱疲労寿命はエネルギ損失または塑性ひずみ範囲が小さいほど，長くなることが知られている。このことから，耐力／エネルギ損失または耐力／塑性ひずみ範囲という比をとって熱疲労寿命を整理した結果，この両者には，良い直線関係が得られることがわかった。従って，本発明は，この耐力／エネルギ損失および耐力／塑性ひずみ範囲を用いて熱疲労寿命を推定する方法を提供する。

本願の第１の発明は，少なくとも２種類以上の同一主成分系の金属材料を用いて，１回の加熱と冷却を１サイクルとする熱疲労試験を行い，熱疲労寿命を求め，その熱疲労試験のサイクルのエネルギ損失を測定し，一方，同一材質の別の試験片を用い，引張試験で測定して求められる耐力をエネルギ損失で除した値と熱疲労寿命の関係を近似式化して，目的とする金属材料の熱疲労寿命をその材料での耐力／エネルギ損失の値から推定することを特徴とする。ここで，拘束率は，０を越える値であれば十分であるが，一番望ましい拘束率

は1（完全拘束）である。また，熱疲労試験の最低温度が－40℃以上で，加熱・冷却での試験片標点部の最高温度と最低温度の差は300℃以上であることが望ましい。さらに，試験片の拘束率が0を越える値であり，最低温度が－40℃以上で，加熱・冷却での試験片標点部の最高温度と最低温度の差が300℃以上であると，より正確な推定ができる。

本願の第2の発明は，少なくとも2種類以上の同一主成分系の金属材料を用いて，1回の加熱と冷却を1サイクルとする熱疲労試験を行い，熱疲労寿命を求め，その熱疲労試験のサイクルの塑性ひずみ範囲を測定し，一方，同一材質の別の試験片を用い，引張試験で測定して求められる耐力を塑性ひずみ範囲で除した値と熱疲労寿命の関係を近似式化して，目的とする金属材料の熱疲労寿命をその材料での耐力／塑性ひずみ範囲の値から推定することを特徴とする。ここで，拘束率は，0を越える値であれば十分であるが，一番望ましい拘束率は1（完全拘束）である。また，熱疲労試験の最低温度が－40℃以上で，加熱・冷却での試験片標点部の最高温度と最低温度の差は300℃以上であることが望ましい。さらに，試験片の拘束率が0を越える値であり，最低温度が－40℃以上で，加熱・冷却での試験片標点部の最高温度と最低温度の差が300℃以上であると，より正確な推定ができる。

本願第1の発明の具体的方法を以下（イ）から（チ）に詳細に説明する。

（イ）　試験片を拘束しないで，試験片標点部を均一に加熱・冷却し，試験片標点部の自由熱膨張による変位を測定して，熱疲労試験を行う温度範囲の線膨張係数を求める。

（ロ）　発生する熱ひずみを制御する熱疲労試験において，最低温度と最高温度の間で試験片標点部を均一に加熱・冷却し，そのときの試験片端面に働く応力および試験片標点部の温度，試験片標点部から検出される変位量を測定する。この試験を試験片が破損するまで繰り返す。（以下，この試験片が破損した時の繰返し数を熱疲労寿命という。）

（ハ）　（ロ）で求めた変位量から（イ）で求めた自由熱膨張による変位量を差し引くことにより，各温度での熱ひずみ量とする。そこで，温度T（$T_{min} \leq T \leq T_{max}$）において，試験片標点部の拘束率$\eta$は（2）式で定義する。

$$\varepsilon_{Th}(T) = \varepsilon_{el}(T) - \int_{T_{min}}^{T} \alpha(T)\,dT \quad (1)$$

$$\eta = \frac{-\varepsilon_{Th}(T)}{\int_{T_{min}}^{T} \alpha(T)\,dT} \quad (2)$$

ここで，$\varepsilon_{Th}(T)$は温度Tにおける熱ひずみ，$\alpha(T)$は温度Tにおける線膨張係数，$\varepsilon_{el}(T)$は伸び計より検出される温度Tにおける変位量，ηは拘束率である。

（ニ）　熱疲労試験の初期のサイクル（望ましくは，熱疲労試験は長時間を必要とされるため，初期の1または2サイクル目の熱疲労試験サイクルを用いる）の（ロ）で求めた応力と（ハ）で求めた熱ひずみ量を用いて応力－熱ひずみのヒステリシスループを描き，ループで囲まれた面積，すなわち，エネルギ損失を求める。

（ホ）　（イ）から（ニ）での熱疲労試験と同一材質を用いて引張試験を行うことにより，耐力を求める。

（ヘ）　（ニ）と（ホ）を用いて耐力／エネルギ損失を求める。

以上（イ）から（ヘ）を異なる金属材料を2種類以上用いて行い，耐力／エネルギ損失と熱疲労寿命の関係式を求める。

（ト）　目的とする同一主成分系の金属材料のある熱疲労試験条件下での熱疲労寿命を推定するために（ニ）（ホ）（ヘ）を行う。

（チ）　（ト）で求めた値および先に求めた関係式を用いて熱疲労寿命を推定する。ここで，耐力は，熱疲労寿命を比較する材質間で同じ温度で測定されているのが望ましい。通常，室温の耐力を用いる。

本願第2の発明は，前記第1の発明の具体的方

法において，（ニ）で得られるヒステリシスループから塑性ひずみ範囲Δε，（第５図参照）を求め，（ヘ）（ト）のエネルギ損失を塑性ひずみ範囲に置き換えることにより行われる。

〔作用〕

第１図を用いて，本願第１の発明の作用を説明する。第１図の縦軸の耐力／エネルギ損失の中のエネルギ損失は，あるサイクルでの応力－ひずみヒステリシスの面積である。また，耐力は，熱疲労試験で供した材料と同一材質の引張試験片で引張試験を行い求めたものである。

第１図は，４種類の鉄系材料のそれぞれの同一試験条件下での耐力とエネルギ損失を用いて縦軸の耐力／エネルギ損失を求め，それぞれの熱疲労寿命との関係をプロットした図である。第１図中の直線は，図中４材質から得られた結果を最小２乗法により直線の関係式を求めて得られたものである。熱疲労寿命を推定したい鉄系材料の耐力，および熱疲労試験を数サイクル行いエネルギ損失を求めることにより，耐力／エネルギ損失を求め，第１図中の直線の関係式を用いて熱疲労寿命を推定する。

従って，異なる鉄系材料を２種類以上用いて，耐力／エネルギ損失と熱疲労寿命の関係式を求めておけば，熱疲労寿命の短いオーステナイト系鋳鉄や，熱疲労寿命の長いフェライト系鋳鋼等の熱疲労寿命を短時間で推定することができる。

〔実施例〕

（実施例１）　本発明を実施するには，線膨張係数を求めるための自由熱膨張試験，熱疲労寿命またはエネルギ損失を求めるための熱疲労試験，耐力を求めるための引張試験の３種を必要とする。以下に，これらの試験方法および試験条件の一実施例をを示す。

第３図に熱疲労試験装置の概要を示す。

自由熱膨張試験では，ロードセル５で検出される荷重が０となるように制御を行い，試験片１標点部を高周波誘導加熱装置４を用いて均一に加熱・冷却を行った。このとき，試験片１標点部に溶接した熱電対３から検出される温度，試験片１標点部につきあてた伸び計２から検出される変位をパーソナルコンピュータ１２を用いてフロッピーディスクに記録した。この熱電対３から得られた温度と伸び計２から検出される変位量との関係から線膨張係数を求めた。この試験は，室温から９００℃までを２分で昇温し，９００℃から室温までを４分で降温する条件で行った。

熱疲労試験では，室温で無負荷の状態から，伸び計２で検出される変位量が０，すなわち拘束率が１となるように制御し，第４図（イ）の温度波形に示す下限温度Ｔｍｉｎまで試験片１標点部の温度を上げる。このとき，試験片１の熱膨張による変位が０となるように制御をかけているため，試験片１には圧縮の荷重がかかる。その状態から，第３図（イ）の温度サイクルを試験片１に与えた。そのとき伸び計２より検出される変位およびロードセル５より検出される応力は，それぞれ第３図（ロ）と（ホ）に示すようになる。この試験の試験条件は；下限温度Ｔｍｉｎ１５０℃，上限温度Ｔｍａｘ９００℃，昇温時間ｔｕｐ２分，降温時間ｔｄｏｗｎ４分，上限温度保持時間ｔｈ１分である。熱ひずみは，伸び計２より検出されるひずみ量から自由熱膨張ひずみ量を差し引くことにより求めた。その熱ひずみ量とそのとき発生する応力との関係を第４図に示す。第５図の応力－熱ひずみのヒステリシスループを用い，ループで囲まれた面積即ちエネルギ損失Ｓを求めた。

耐力は，室温で引張試験を行うことにより求めた。

耐力／エネルギ損失と熱疲労寿命の関係式を求めるため，第１表に示す鉄系の４種類の材質Ａ，Ｂ，Ｃ，Ｄを用いた。ここで，材質Ａ，Ｂは，１８ｗｔ％のＣｒを含有するフェライト系ステンレス鋳鋼であり，Ｃはニレジスト鋳鉄と呼称されるＦＣＤＡ－ＮｉＳｉＣｒ３５５２，Ｄは同じくＦＣＤＡ－ＮｉＣｒ２０２である。これらの４材質について，熱疲労試験，自由熱膨張試験および引張試験を行った。その試験結果を第１表に示す。

第1表 材質A，B，C，Dの試験結果

材質	室温耐力 (MPa)	エネルギ損失 (MPa)	熱疲労寿命 (回)	室温耐力／エネルギ損失 ($\times 10^2$)
A	301	2.43	205	1.24
B	465	2.96	268	1.57
C	236	3.51	63	0.67
D	222	3.19	122	0.70

そして，第1表の熱疲労寿命を横軸に，耐力／エネルギ損失を縦軸にプロットした関係図を第1図に示す。次に，最小2乗法により求められた熱疲労寿命と耐力／エネルギ損失の関係式は次式である。

$$Nf = 201 \times P - 45 \qquad (3)$$

ここで　Nf：熱疲労寿命（回）

P　：耐力／エネルギ損失（$\times 10^2$）

つぎに，（3）式から，本発明の熱疲労寿命の推定方法の検討を行うため，第2表に示す2種類の材質E，Fを用いて前記と同様の室温耐力とエネルギ損失を求めるための試験を行った。ここで，材質E，Fは，フェライト系ステンレス鋳鋼である。その結果を第2表に示す。

第2表 材質E，Fの試験結果

材質	室温耐力 (MPa)	エネルギ損失 (MPa)	室温耐力／エネルギ損失 ($\times 10^2$)
E	600	2.31	2.60
F	402	2.44	1.65

第2表中の耐力／エネルギ損失から（3）式を用いて熱疲労寿命を推定した結果と，実際に熱疲労試験により求められた熱疲労寿命との差異を第3表に示す。

第3表 実際の熱疲労寿命と予測寿命

材質	実際の寿命 (回)	予測寿命 (回)	寿命差 (回)	誤差 (%)
E	490	476	14	2.8
F	291	286	5	1.7

第3表に示す通り，実際の寿命と予測寿命の差はEが2.8%，Fが1.7%とわずかであり，各種鉄系材料の熱疲労寿命の推定が可能である。

（実施例2）　本発明を実施するには，線膨張係数を求めるための自由熱膨張試験，熱疲労寿命またはエネルギ損失を求めるための熱疲労試験，耐力を求めるための引張試験の3種を必要とする。以下に，これらの試験方法および試験条件の一実施例を示す。

第5図に熱疲労試験装置の概要を示す。

自由熱膨張試験では，ロードセル5で検出される荷重が0となるように制御を行い，試験片1標点部を高周波誘導加熱装置4を用いて均一に加熱・冷却を行った。このとき，試験片1標点部に溶接した熱電対3から検出される温度，試験片1標点部につきあてた伸び計2から検出される変位をパーソナルコンピュータ12を用いてフロッピーディスクに記録した。この熱電対3から得られた温度と伸び計2から検出される変位量との関係から線膨張係数を求めた。この試験は，室温から900℃までを2分で昇温し，900℃から室温までを4分で降温する条件で行った。

熱疲労試験では，室温で無負荷の状態から，伸び計2で検出される変位量が0，すなわち拘束率が1となるように制御し，第3図（イ）の温度波形に示す下限温度Tminまで試験片1標点部の温度を上げる。このとき，試験片1の熱膨張による変位が0となるように制御をかけているため，試験片1には圧縮の荷重がかかる。その状態から，第3図（イ）の温度サイクルを試験片1に与えた。そのとき伸び計2より検出される変位およびロードセル5より検出される応力は，それぞれ第3図（ロ）と（ホ）に示すようになる。この試験の試験条件は，下限温度Tmin150℃，上限温度Tmax900℃，昇温時間tup2分，降温時間tdown4分，上限温度保持時間th1分である。熱ひずみは，伸び計2より検出されるひずみ量から自由熱膨張ひずみ量を差し引くことにより求めた。その熱ひずみ量とそのとき発生する応力との関係を第5図に示す。第5図の応力－熱ひ

ずみのヒステリシスループと熱ひずみ軸との交点間の距離，即ち，塑性ひずみ範囲を求めた。

耐力は，室温で引張試験を行うことにより求めた。

耐力／塑性ひずみ範囲と熱疲労寿命の関係式を求めるため，第１表に示す鉄系の４種類の材質G，H，I，Jを用いた。ここで，材質G，H，Iは，１８ｗｔ％のＣｒを含有するフェライト系ステンレス鋳鋼であり，Jはニレジスト鋳鉄と呼称されるＦＣＤＡ－ＮｉＣｒ２０２である。これらの４材質について，熱疲労試験，自由熱膨張試験および引張試験を行った。その試験結果を第４表に示す。

第4表 材質G，H，I，Jの試験結果

材質	室温耐力 (MPa)	塑性ひずみ範囲 (%)	熱疲労寿命 (回)	室温耐力／塑性ひずみ範囲 ($\times 10^2$)
G	300	0.88	185	3.42
H	460	0.83	260	5.54
I	377	0.79	216	4.78
J	191	1.27	66	1.50

そして，第４表の熱疲労寿命を横軸に，耐力／塑性ひずみ範囲を縦軸にプロットした関係図を第２図に示す。次に，最小２乗法により求められた熱疲労寿命と耐力／塑性ひずみ範囲の関係式は次式である。

$$Nf = 46 \times Q + 6 \qquad (4)$$

ここで　Ｎｆ：熱疲労寿命（回）

Ｑ　：耐力／塑性ひずみ範囲（$\times 10^2$）

つぎに，（４）式から，本発明の熱疲労寿命の推定方法の検討を行うため，第５表に示す２種類の材質K，Lを用いて前記と同様の室温耐力と塑性ひずみ範囲を求めるための試験を行った。ここで，材質K，Lは，フェライト系ステンレス鋳鋼である。その結果を第５表に示す。

第5表 材質K，Lの試験結果

材質	室温耐力 (MPa)	塑性ひずみ範囲 (%)	室温耐力／塑性ひずみ範囲 ($\times 10^2$)
K	650	0.72	9.03
L	400	0.77	5.19

第５表中の耐力／エネルギ損失から（４）式を用いて熱疲労寿命を推定した結果と，実際に熱疲労試験により求められた熱疲労寿命との差異を第６表に示す。

第6表 実際の熱疲労寿命と予測寿命

材質	実際の寿命 (回)	予測寿命 (回)	寿命差 (回)	誤差 (%)
K	435	420	15	3.5
L	255	245	10	3.9

第６表に示す通り，実際の寿命と予測寿命の差はKが３．５％，Lが３．９％とわずかであり，各種鉄系材料の熱疲労寿命の推定が可能である。

〔発明の効果〕

熱疲労寿命が比較的短いニレジスト鋳鉄や，主相が大きく異なる熱疲労寿命の長いフェライト系ステンレス鋳鋼から得られる熱疲労寿命推定式を用いても，熱疲労寿命の未知なその他の材料についての耐力／エネルギ損失または耐力／塑性ひずみ範囲を求めることにより寿命の推定が可能である。このことより，熱疲労寿命の長い金属材料を破損するまで長時間かけて試験する必要がなくなり，材料の開発工数の大幅な短縮ができるものである。

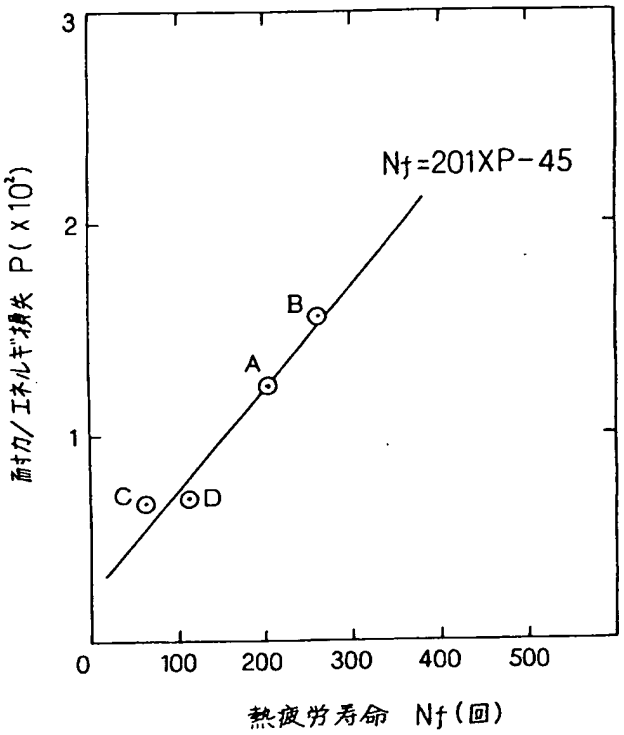
４．図面の簡単な説明

第１図は熱疲労寿命と耐力／エネルギ損失の関係図，第２図は熱疲労寿命と耐力／塑性ひずみ範囲の関係図，第３図は熱疲労試験に用いた試験機の制御ブロック図，第４図は１サイクル中の温度，伸び計から検出されるひずみ量，自由熱膨張ひずみ量，熱ひずみ量，および応力の時間に伴う変化を示した模式図，第５図は第４図中の応力と熱ひずみ量の関係を示す模式図である。

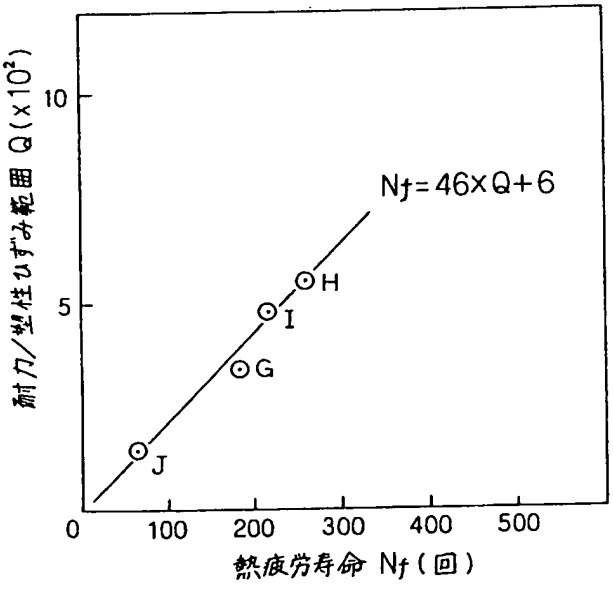
1 試験片，2 伸び計，4 高周波誘導加熱装置，
5 ロードセル，12 パーソナルコンピューター

出願人　日立金属株式会社

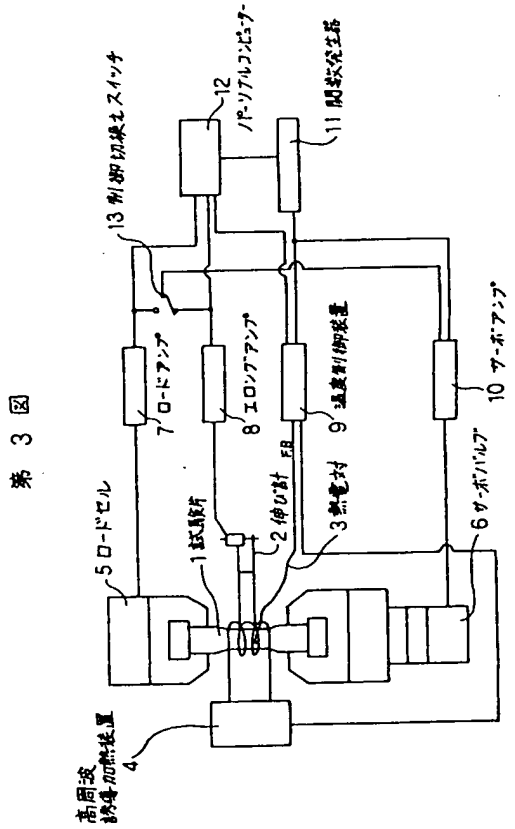
第 1 図



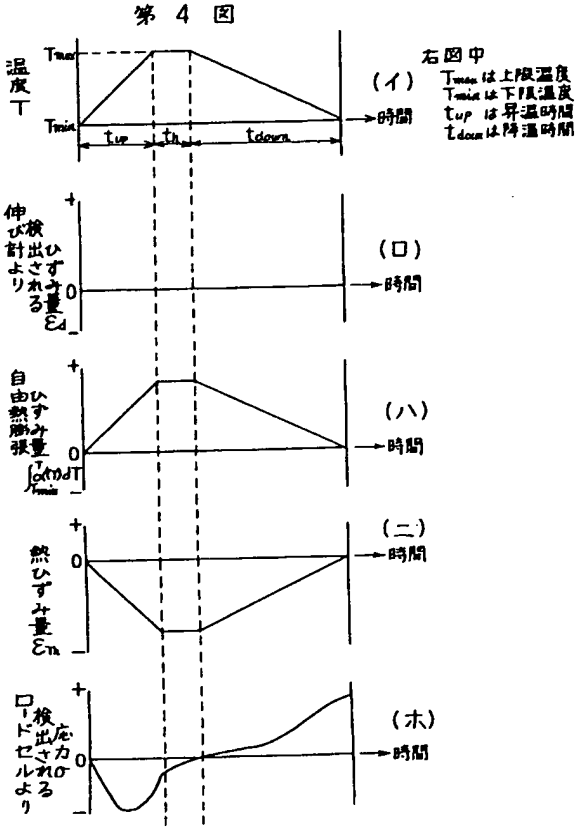
第 2 図



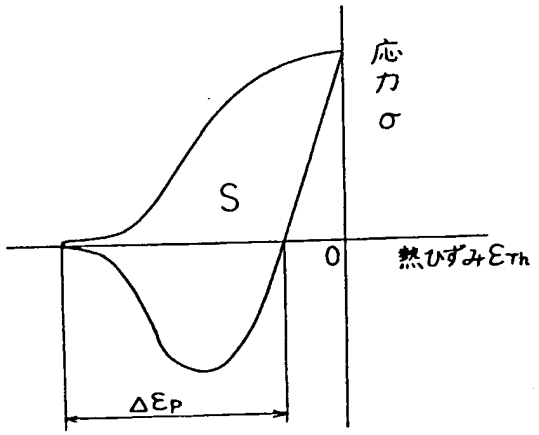
第 3 図



第 4 図


温度T
Tmax
Tmin
tup
th
tdown
時間
(イ)
右図中
Tmax は上限温度
Tmin は下限温度
tup は昇温時間
tdown は降温時間
伸び計より検出されるひずみ量 εd
(ロ)
自由熱膨張ひずみ量 ∫αtmdT
(ハ)
熱ひずみ量 εth
(ニ)
ロードセルより検出される応力σ
(ホ)

第 5 図


応力σ
S
0
熱ひずみεTh
ΔεP